

자극제로서 폐내화물 및 탈황석고가 일라이트 및 고로슬래그 다량 치환 모르타르의 물성에 미치는 영향

Effects of Waste Refractory Powder and Desulfurization Gypsum as Activator on the Properties of High Volume Blast Furnace Slag Mortar with Illite

윤원근¹ · 한민철^{2*}

Weon-Keun Yun¹ · Min-Cheol Han^{2*}

(Received June 7, 2017 / Revised June 21, 2017 / Accepted June 23, 2017)

The objective of this paper is to investigate the effect of waste refractory powder(WRP) and desulfurization gypsum(FGD) as activators on the flow properties and the strength development of high volume blast furnace slag mortar incorporating illite(BSM) having adsorption and deodorization. To fabricate the BSMs with 60% of W/B, blast furnace slag are incorporated with 45% and 65%, respectively. WRP and FGD are substituted from 5 to 10%. Test results indicate that the flow is decreased with increase of WRP and FGD, while increase of WRP and FGD enhance the compressive strength due to accelerated reaction of blast furnace slag, The use of illite results in a decrease of compressive strength. pH has increasing tendency until 7days, while it has reduction. In this paper, optimal dosages of WRP and FGD are believed to be around 5% each.

키워드 : 일라이트, 폐내화물, 탈황석고, 고로슬래그 시멘트, 자극제

Keywords : Illite, Wasted refractory powder, Desulfurization gypsum, Blast furnace slag cement, Activator

1. 서론

최근 발생량이 증가하고 있는 산업부산물은 단순한 폐기물이 아닌 재활용이 가능한 중요한 자원으로 인식되고 있다.

환경보호, 지속 가능한 발전을 위하여 시멘트 및 콘크리트산업에 있어서도 자원순환이 중요한 과제가 되고 있다. 즉, 콘크리트 제조에서 산업부산물인 플라이애시, 고로슬래그 미분말(이하 BS) 등을 시멘트 대체재로 치환하는 고전적인 방안 이외에 최근 들어 각종 산업폐기물을 고갈 자원의 대체뿐만 아니라 기능성까지도 추가하여 새로운 역할을 부여하는 등 다양한 접근을 보이고 있는데, 특히 콘크리트 2차 제품 측면에서의 적극적인 활용이 주목받고 있다.

콘크리트 2차 제품의 특징으로는 일반 철근콘크리트와 달리 철

근이 배근되지 않아 중성화가 문제되지 않는다는 것과 증기양생 등과 같이 반응 촉진을 이용할 수 있다는 것이다. 즉, 콘크리트가 중성화 되어도 문제되지 않고, 오히려 생태계에 주었던 알칼리 피해를 막을 수 있다. 그렇다면 콘크리트를 제조할 경우 혼합시멘트 특히 산업부산물인 BS의 치환율을 60~70%까지 높일 수 있는데, 이렇게 되면 응결 지연 및 초기강도 저하 등이 문제될 수 있다.

한편 이러한 BS의 활성도를 향상시켜 초기강도를 개선하기 위해 기존의 연구들에서는 NaOH, Na₂SO₄, KOH 등의 알칼리 자극제들을 활용하는 방법을 제시한 바 있는데(Lee et al. 2012; Yang et al. 2011), 이러한 가성 알칼리계의 자극제는 비용이 고가이고, 배합 및 제조과정상 어려움이 존재하는 것으로 알려져 있다. 따라서 보다 저렴하면서, 시공상 편의 및 자원을 재활용할 수 있는 차원

* Corresponding author E-mail: twhan@cju.ac.kr

¹청주대학교 건축공학과, 박사과정(Department of Architectural Engineering, Cheong-ju University, Doctor course, Cheongju 28503, Korea)

²청주대학교 건축공학과, 부교수(Department of Architectural Engineering, Cheong-ju University, Associate Professor, Cheongju 28503, Korea)

의 대체 자극제에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다. 이러한 대체 자극물질로서 황산염 자극을 유도할 수 있는 산업부산 석고나 MgO에 의한 자극을 유도할 수 있는 폐내화물을 사용할 경우 고로슬래그의 유효한 자극제중 하나로 자원의 재활용 측면에서 효과가 클 것으로 예상된다(Park et al. 2015).

그러므로 본 연구에서는 보다 경제적이면서 재활용 자원을 효과적으로 이용하여 BS의 잠재수경성 반응을 최대한 이끌어 내기 위한 방안으로 폐기물들을 활용하는 것으로서 정제 탈황석고(FGD)의 황산염 자극, 내화벽돌소재인 폐내화물(WRP)의 MgO 자극 그리고 탈황 및 흡착작용을 지닌 일라이트를 치환 사용한 모르타르의 제반 공학적 특성을 분석하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

BS 다량치환 모르타르에 일라이트 및 순환자원을 자극제로 활용하기 위하여 FGD, WRP 및 이들의 치환율 변화에 따른 제반 물성을 검토하기 위한 실험계획은 Table 1과 같다. 먼저 Plain 배합비는 1 : 5, W/B는 60%에서 목표 플로 120±20mm 범위를 만족하도록 배합 설계하는 것으로 계획하였다.

결합재 구성은 Plain인 OPC 100%, 단위결합재량에 대한 질량 비로 BS를 45% 치환사용하는 배합(이하, BSC 45), BS를 65% 치환 사용하는 배합(이하, BSC 65)의 총 3수준으로 계획하였고, Table 2에 배합사항을 제시하였다.

실험변수로 일라이트 치환 모르타르의 제반 특성을 검토하기 위한 일라이트의 치환율은 예비실험을 통하여 단위 골재량에 대한 질량비로 0, 1% 치환 사용하는 것으로 계획하였고, 결합재 종류 및 치환율 변화 WRP 분말 및 FGD를 내할 치환으로 단위 결합재량에 대한 질량비로 0, 5, 10%의 3수준씩 치환하는 것으로 실험 계획하였다.

실험사항으로는 굳지 않은 모르타르에서 플로 및 공기량을 측정하였고, 경화 모르타르에서는 휨강도, 압축강도를 측정하였으며, pH를 측정하는 것으로 실험계획 하였다.

Table 1. Experimental plan of this study

Factor		Levels	
Mixture	B:S(Binder:Sand)	1	· 1:5
	W/B(%)		· 60
	Flow(mm)		· 120±20
	Binder(%)	3	· OPC 100
	Illite replacement ratio(%)		· OPC(55)+BS(45) - BSC 45
			· OPC(35)+BS(65) - BSC 65
	WRP replacement ratio(%)	2	· 0, 1
FGD replacement ratio(%)	· 0, 5, 10		
Experiment	Fresh mortar	2	· Flow
			· Air content
	Hardened mortar	3	· Flexural strength(3, 28days)
			· Compressive strength(3, 7, 28 days)
			· pH measurement

Table 2. Mixture proportions of mortar

Binder(%/wt.)	Illite replacement(%)	Activator	B : S	W/C(%)	Unit volume weight(kg/m ³)						
					W	OPC	BS	Illite	WRP	FGD	Ra ¹⁾
OPC	-	-	1:5	60	200	333	-	-	-	-	832
BSC 45	0	-			199	182	149	-	-	-	828
BSC 65	0	-			198	116	215	-	-	-	827
		WRP 5%			197	110	204	-	16	-	827
		WRP 10%			198	104	193	-	33	-	827
		FGD 5%			198	110	204	-	-	16	827
		FGD 10%			198	104	193	-	-	33	827
		-			199	116	215	17	-	-	819
BSC 65	1	-			199	110	204	17	16	-	819
		WRP 5%			199	104	194	17	33	-	819
		WRP 10%			199	110	204	17	-	16	819
		FGD 5%			199	110	204	17	-	16	819
		FGD 10%	199	104	210	17	-	33	819		
		-	199	104	210	17	-	33	819		

1) Recycled fine aggregate

2.2 사용재료

본 실험에서 사용된 시멘트, BS, WRP, FGD, 일라이트 및 골재는 모두 국내산을 사용하였는데, 입자의 형태는 Fig. 1과 같고, 그 물리·화학적 성질은 Tables 3~8과 같다.



Fig. 1. Appearance of each activators

Table 3. Physical properties of cement

Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	Setting time(min.)		Compressive strength(MPa)		
		Initial	Final	3days	7days	28days
3.15	3 520	250	310	12.5	22.5	42.5

Table 4. Physical and chemical properties of BS

Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	L.O.I (%)	Chemical components(%)				
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
2.89	4 520	1.50	34.2	14.6	0.32	42.3	6.4

Table 5. Physical and chemical properties of WRP

Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	L.O.I (%)	Chemical components(%)					
			SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
3.12	3 826	3.6	34.4	2.2	32.8	2.7	21.3	0.7

Table 6. Physical and chemical properties of FGD

Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	L.O.I (%)	Chemical components(%)				
			SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	C
2.97	3 820	4.3	4.1	0.1	6.0	1.4	1.48

Table 7. Physical and chemical properties of Illite

Particle size(μm)	Density (g/cm ³)	Hygroscopic moisture (%)	Chemical components(%)		K ₂ O(ppm)
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	
2~4	2.80	0.37	76.35	8.17	5 739

Table 8. Physical and chemical properties of fine aggregate

Type	Density (g/cm ³)	water absorption ratio(%)	Fineness modulus	Passing ratio of 0.08mm sieve(%)
Recycled	2.43	5.20	2.62	8.86

2.3 실험방법

본 연구의 실험방법으로 먼저, 굳지 않는 모르타르 실험으로 플로는 KS L 5111, 공기량은 KS F 2421에 의거하여 측정하였고, 경화모르타르의 실험으로 압축강도는 KS L 5105에 의거하여 실시하였고, 휨강도는 KS L 2325에 의하여 실시하였으며, pH 측정은 KS F 2103에 의거하여 실시하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 굳지않은 모르타르의 특성

Fig. 2은 일라이트 치환율 및 결합재 종류 별 WRP 및 FGD치환율 변화에 따른 플로치를 나타낸 그래프이다.

전반적으로 WRP, FGD 치환율이 증가할수록 OPC 및 BSC 45 보다 플로우가 감소하는 경향을 나타내었다. 먼저 분말형태의 WRP을 결합재로 치환한 경우 시멘트에 비해 다소 높은 분말도를 가진 WRP가 치환됨에 따라 높은 점성으로 인하여 플로우가 감소된 것으

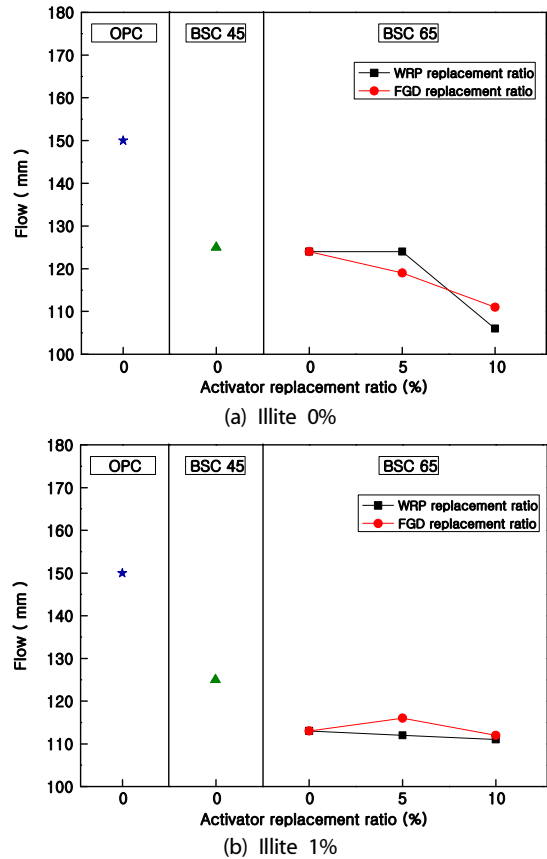


Fig. 2. Flow in accordance with the binder replacement ratio

로 판단되며, FGD의 경우에도 WRP 분말과 유사한 경향을 나타내었는데, 이는 시멘트에 비해 높은 분말도를 가진 분말이 치환됨에 따라 높은 점성으로 인하여 플로라 감소된 원인 및 FGD 치환시 BS의 사용량이 감소되어 유동성이 감소한 것으로 판단된다. 일라이트를 치환한 경우에도 전반적으로 플로라 감소하였는데, 이는 점토광물인 일라이트의 물리적 특성상 수분 흡착력이 강함에 따라 모르타르 내부의 동일한 구속수가 점차 감소함으로써 점성 증가에 기인하여 플로치가 감소한 것으로 사료된다.

Fig. 3은 일라이트 치환율 및 결합재 종류 별 WRP 및 FGD 치환율 변화에 따른 공기량을 나타낸 그래프이다. 먼저 WRP 분말 및 정제된 FGD를 결합재로 치환사용한 배합의 경우에 치환율이 증가할수록 OPC와 BSC 45보다 공기량이 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 WRP과 FGD의 경우 시멘트보다 높은 분말도 특성을 나타냄에 따라 미세입자가 모르타르 내부의 공극을 채워줌에 따라 적은 공기량을 나타낸 것으로 사료된다. 일라이트를 치환할 시 공기량이 감소하는 경향을 나타내었는데, 이는 점토광물인 일라이트의 미세한 입자가 모르타르의 공극을 채워줌에 따라 공기량이 저하된 것으로 사료된다.

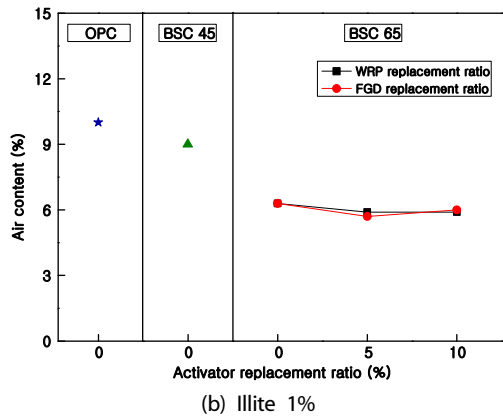
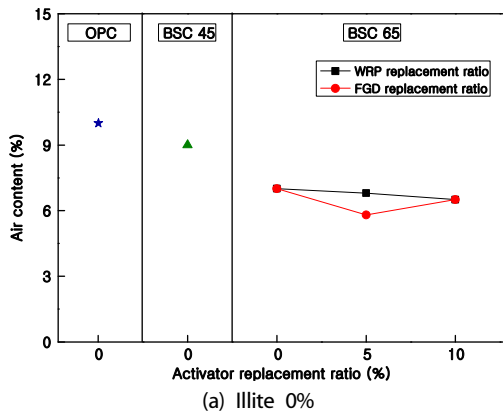


Fig. 3. Air content in accordance with the binder replacement ratio

3.2 경화 모르타르의 특성

Fig. 4는 일라이트 치환율 및 결합재 종류 별 WRP 및 FGD 치환율 변화에 따른 재령별 휨강도를 나타낸 그래프이다.

전반적으로 결합재 종류와 상관없이 BSC 65에 결합재를 10% 치환사용한 배합의 경우는 OPC 100% 및 BSC 45 배합에 비해 초기강도는 높게 나타났다. 반면 28일 강도의 경우 결합재 치환율이 증가할수록 BSC 45와 유사하거나 높은 강도치를 나타내었다. 이는 전술한 바와 같이 다량의 BS가 잠재수경성 반응에 의해 강도가 증가된 것으로 판단되고, 일라이트를 치환할 시 수화 반응에 관여하는 결합재량의 저감으로 인해 강도가 감소된 것으로 분석된다. 결합재 종류 변화에 따른 강도 특성으로 WRP 분말을 치환할수록 강도는 증가되는 경향을 나타내었는데, 이는 WRP에 포함되어 있는 MgO성분이 모르타르 내부의 구속수와 반응하여 시멘트 조직에서 Mg(OH)₂의 수화물을 생성함에 따라 내부조직을 치밀하게 하여 WRP 치환율이 증가할수록 강도가 증가한 것으로 판단되고, Mg(OH)₂가 BS의 잠재수경성 반응을 추가적으로 촉진시킨 결과 휨강도가 향상된 것으로 판단된다. FGD의 경우에도 치환율이 증

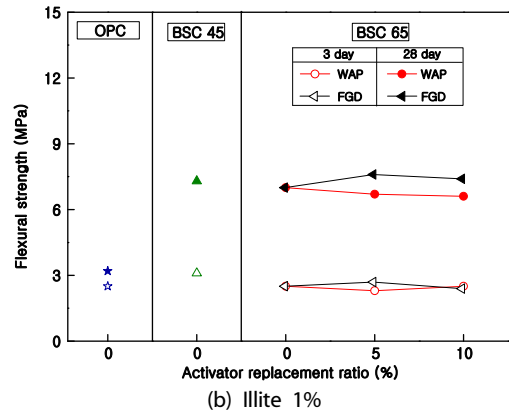
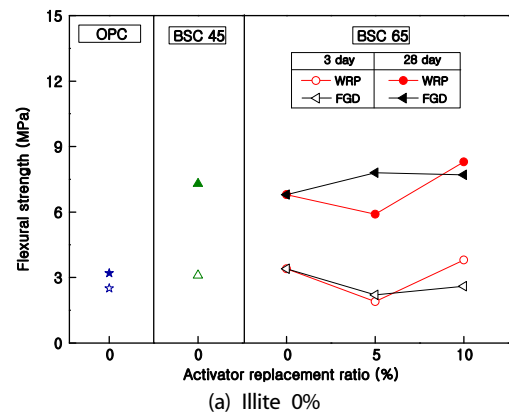


Fig. 4. Flexural strength with the binder and activator combinations

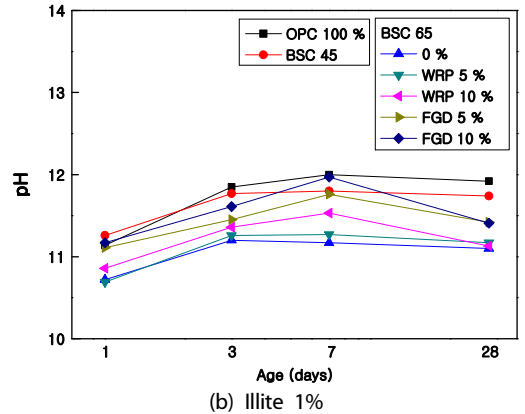
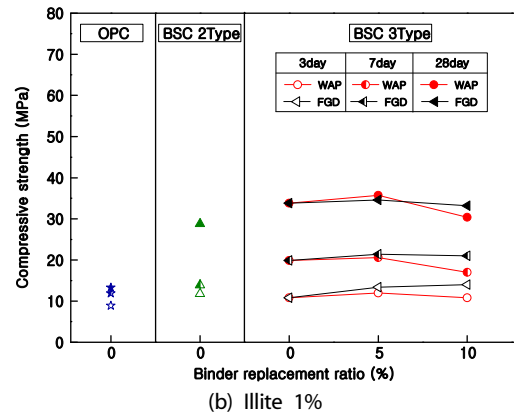
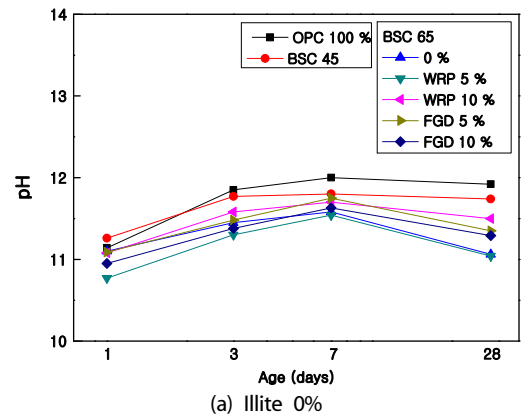
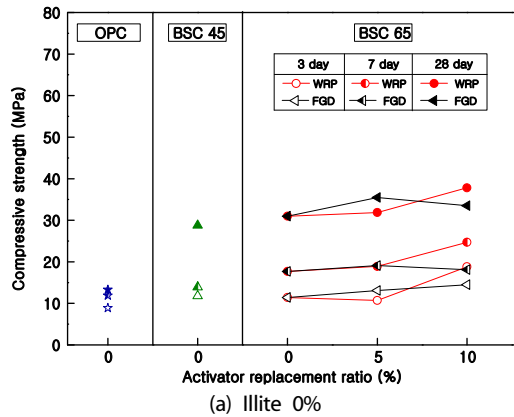


Fig. 5. Compressive strength with the binder and the activator combinations

Fig. 6. pH variations with the binder and activator combinations

가할수록 BS의 잠재수경성 반응 촉진으로 힘강도가 증가하는 양상을 나타내었다.

Fig. 5는 일라이트 치환율, WRP 및 FGD 치환율 변화에 따른 재령별 압축강도를 나타낸 그래프이다.

전반적으로 자극제를 치환하지 않은 BSC 45 배합에 비해 BSC 65 배합이 자극제 치환율이 증가할수록 높은 압축강도 발현을 나타내었고, 일라이트를 치환할 경우 압축강도는 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 BSC 65의 경우 다량의 BS와 결합재가 함유됨에 따라 잠재수경성 반응에 의해 강도가 증가된 것으로 판단되고, 일라이트를 치환할 경우 수화 반응에 악영향을 주어 강도가 감소된 것으로 판단된다. 결합재 종류 변화에 따른 강도 특성으로, 일라이트 0% 치환사용의 경우 WRP 분말을 치환한 경우 강도는 증가되는 경향을 나타내었으며, FGD의 경우에도 결합재 종류와 상관없이 치환율이 증가할수록 압축강도가 증가하는 경향을 나타내었는데, 이는 WRP 및 FGD의 MgO 및 SO₃성분에 의해 BS의 잠재수경성 반응을 촉진 시킴에 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 6은 일라이트 치환율 및 결합재 종류별 치환율 변화에 따른

재령별 pH 측정을 나타낸 그래프이다.

먼저 일라이트 0%와 WRP 및 FGD를 치환한 배합이 OPC 100% 배합에 비해 낮은 pH값을 나타내었다. 즉, OPC 100%의 배합의 경우 약 12정도의 높은 pH값을 나타낸 반면에, BSC2에 결합재를 치환하지 않은 배합은 약 11.3~11.7, WRP 분말을 결합재로 치환 사용한 배합은 약 11.0~11.5, FGD를 치환 사용한 배합은 11.2~11.7 정도의 pH값을 나타내었다. 또한, 재령 7일까지 모든 배합에서 pH가 증가하는 경향을 나타낸 반면에, 재령 28일의 경우에는 감소하는 경향을 나타내었으며, 일라이트를 치환할 경우 미소하게 감소하는 경향을 나타내었다.

4. 결론

본 연구에서는 BS의 활성화를 향상시키기 위한 방안으로 산업 부산물인 FGD의 SO₃ 자극, WRP의 MgO 자극에 탈취 및 흡착작용을 지닌 천연재료인 일라이트를 치환하여 기능성을 부여한 BS 다량치환 모르타르의 제반 공학적 특성을 분석하였는데, 그 결과를

요약하면 다음과 같다.

1. 유동특성의 경우 전반적으로 일라이트, WRP 및 FGD의 치환율이 증가할수록 감소하는 것으로 나타났고, BSC 65에 각종 결합재를 치환하였을 경우 OPC 100%와 BSC 45보다 낮은 유동성을 나타내었는데, 특히 결합재의 치환율이 증가할수록 낮은 유동성을 나타내었다. 이는 시멘트 보다 높은 분말도를 갖은 결합재를 치환함에 따라 높은 점성으로 인하여 플로가 감소된 것으로 분석된다.
2. 공기량의 경우 전반적으로 OPC와 BSC 45보다 BSC 65에 WRP 및 FGD 치환율이 증가할수록 낮은 공기량을 나타내었다. 일라이트를 1% 치환한 경우 WRP 분말 및 FGD의 공기량은 서로 유사한 값을 내었으며, 일라이트 0%보다 1% 치환 시 전체적인 배합은 낮은 공기량을 나타내었다. 이는 결합재를 치환사용할 경우 미세입자가 모르타르 내부의 공극을 채워줌으로써 적은 공기량을 나타낸 것으로 사료되며, 일라이트를 치환할 경우 점토광물인 일라이트의 미세한 입자가 모르타르의 공극을 채워줌에 따라 공기량이 저하된 것으로 사료된다.
3. 휨강도 및 압축강도의 경우는 전반적으로 일라이트를 치환할 시 감소하는 경향을 나타내었고, WRP 및 FGD의 치환율이 증가함에 따라 휨강도 및 압축강도가 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 결합재 치환율이 증가할수록 WRP 및 FGD에 함유되어 있는 MgO 및 SO₃성분에 의해 BS의 잠재수경성 반응을 촉진 시킴에 기인한 것으로 판단된다.
4. pH의 경우는 전반적으로 재령 7일까지 증가하는 경향을 나타내었고, 재령 28일의 경우에는 감소하는 경향을 나타내었으며, 일라이트 치환 시 미소하게 감소, WRP 및 FGD 치환율이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다.

References

Choi, H.B. (2015). "Application of waste refractory aggregate as aggregate for concrete," Proceedings of the Korean Recycled Construction Resources Institute, **10(2)**, 295–296 [in Korean].

Han, C.G. (2003). Building Materials Experiment, Kimoonang [in Korean].

Han, C.G. (2013). Properties of high volume blast furnace slag concrete using recycled aggregate with incineration waste ash, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, **1(2)**, 107–113 [in Korean].

Korea Environment Corporation (2010). Set Quality Certification Criteria for Waste Gypsum Recycling Intermediate Processed Article Research [in Korean].

Korean Agency for Technology and Standards (2016). KS L 5210 「Furnace Slag Cement」 [in Korean].

Lee, C.E. (2013). A Study on Application of Eco Construction Material Using Illite, Ph.D Thesis, Tongmyong University [in Korean].

Lee, S.S., Bae, S.W., Song, H.Y. (2012). Physical properties of pastes and mortars based on mixing ratios of ternary system inorganic composites and addition percentage of alkali accelerator, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, **28(12)**, 77–84 [in Korean].

Park, S.J., Kim, J.H., Hyung, W.G. (2015). Properties of non-sintered cement mortar using alkali and sulfate mixed stimulants according to curing method, Journal of the Korea Concrete Institute, **27(3)**, 236–243 [in Korean].

Park, K.T. (2011). "Proposal of optimized mix proportion of blast furnace slag mortar using the recycled fine aggregates depending on binder types and contents," Proceedings of the Korean Recycled Construction Resources Institute, **6(1)**, 37–38 [in Korean].

Son, G.M. (2002). USN-based Measurement of Greenhouse Environment and Prediction of CO₂ Emission from Soil, Ph.D Thesis, Sungkyunkwan University [in Korean].

Yang, K.H., Sim, J.I., Song, J.G., Lee, J.H. (2011). Material properties of slag-based alkali-activated concrete brick masonry, Journal of Architecture Institute of Korea, **27(1)**, 119–126 [in Korean].

자극제로서 폐내화물 및 탈황석고가 일라이트 및 고로슬래그 다량 치환 모르타르의 물성에 미치는 영향

본 연구는 고로슬래그 기반 모르타르에 잠재수경성 반응을 유도하기 위해 자극제로써의 역할로 WRP 및 FGD를 활용하고, 이에 탈취 및 흡착성분을 지닌 천연재료인 일라이트를 활용하여 기능성을 부여한 모르타르 환경에서 결합재 치환율 변화에 따른 모르타르의 유동성 및 강도특성을 분석하고자 한다. 실험결과, 플로는 일라이트 및 결합재 치환율이 증가할수록 유동성은 감소하는 것으로 나타났다. 공기량은 OPC와 결합재를 치환하지 않은 BSC 45를 사용한 배합 보다 BSC 65를 사용한 배합에서 낮은 공기량을 나타내었으며, 일라이트를 1% 치환한 경우 WRP 분말 및 FGD의 공기량은 서로 유사한 값을 나타냈으며, 일라이트 0%보다 전체적인 배합은 낮은 공기량을 나타내었다. 힘강도 및 압축강도의 경우는 일라이트를 치환할 시 강도는 낮아졌으며, WRP 및 FGD 치환율이 증가할수록 잠재수경성 반응으로 인해 강도는 증가하는 경향을 나타내었다. pH는 전반적으로 재령 7일까지 증가하는 경향을 나타내었고, 재령 28일의 경우에는 감소하는 경향을 나타내었으며, 일라이트를 치환할 시 미소하게 감소하는 경향을 나타내었다. 따라서, 유동성 및 강도특성 측면을 종합적으로 고려할 때 WRP 5%, FGD 5% 치환사용하는 경우가 최적의 배합인 것으로 판명되었다.